循环经济助推碳中和的路径和对策建议

魏文栋[1,2] 陈竹君[3] 耿 涌[1,2,4*] 蔡闻秋[1,2] 刘瀚斌[5]

1 上海交通大学 国际与公共事务学院 上海 200030
2 上海交通大学-联合国工业发展组织绿色增长联合研究院 上海 200030
3 上海理工大学 管理学院 上海 200093
4 上海交通大学 环境科学与工程学院 上海 200240
5 上海市发展和改革委员会 上海 200003

摘要 在当前日益复杂的国际局势下开展全球气候治理面临更多挑战。作为全球二氧化碳（CO_2）排放总量最多的国家，中国承诺力争在2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和。然而，碳中和是一项复杂的系统工程，急需通过发展循环经济等手段来实现。文章基于减量化、再利用和资源化的“3R”原则，剖析发展循环经济与实现碳中和的内在联系，对比国内外发展现状，阐释循环经济在实现碳中和目标中的关键作用，为促进我国通过循环经济助力实现碳中和目标提出政策建议。

关键词 循环经济，碳中和，“3R”原则，资源效率，节能，减排

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20210808002

当前，全球应对气候变化形势空前紧迫。为应对气候变化，降低以二氧化碳（CO_2）为主的温室气体排放总量，包括中国在内的37个国家采用纳入国家法律、提交协定或政策宣示的方式正式承诺实现碳中和，另有52个国家做出了口头承诺[1]。作为全球CO_2排放总量最多的国家，我国在2020年9月庄严承诺将力争在2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和。

循环经济（circular economy）的概念最早由英国环境经济学家戴维·皮尔斯（David Pearce）和凯利·特纳（Kerry Turner）[2]于1990年正式提出。1996年，德国开始实施《循环经济与废物处置法》（*Closed Substance Cycle and Waste Management Act*）。随后法国、英国等欧洲国家纷纷效仿德国，发展循环经济逐渐成为全球共识[3]。作为一种科学的、全新的经济发

*通信作者
资助项目：国家重点研发计划（2019YFC1908501），国家自然科学基金（72088101、71904125、71690241、71810107001）
修改稿收到日期：2021年8月31日

展模式，循环经济改变了传统的“开采—生产—废弃”的线性经济模式，实现了经济发展与资源开采和环境影响的脱钩[4]，能够以更少的资源投入创造出更多的社会经济价值，对于实现碳中和目标具有重要价值。英国艾伦·麦克阿瑟基金会的研究表明循环经济可以有效减少产品生产和使用过程的温室气体排放，并提出循环经济的实施可以在2050年减少全球水泥、钢铁、塑料和铝等关键工业材料生产过程中40%的碳排放，减少全球食物系统49%的碳排放[5]。针对欧洲国家的研究也表明，转向循环经济将使相关国家的温室气体排放量减少70%[4]。

循环经济对我国实现碳中和具有重要价值。根据中国循环经济协会的测算，循环经济在“十三五”期间对我国碳减排的综合贡献率超过25%。一方面，循环经济通过资源节约、集约利用，改变产品和材料生产及使用方式，能够有效提高资源产出率，降低单位产品碳排放强度，减少价值链、供应链、产业链上的碳排放；另一方面，循环经济有助于打通要素循环渠道，实现废弃物资源有效回收，能够提升我国资源循环效率，减少我国经济发展对原生资源的依赖，保障国家资源安全，缓解实现碳中和目标可能面临的资源约束问题。在此背景下，本文剖析循环经济与碳中和的内在联系，对比国内外发展现状，阐释循环经济在实现碳中和目标中的关键作用，为促进我国循环经济发展、实现碳中和目标提出政策建议。

1 循环经济是实现碳中和的重要路径

循环经济遵循生态学和经济学规律，旨在通过实施减量化（reduce）、再利用（reuse）和资源化（recycle）的“3R”原则[6]，构建“资源—产品—再生资源”的生产和消费方式，是实现碳中和的重要路径。

1.1 源头控制投入，降低碳排放的减量化原则

*减量化原则通过生态设计和清洁生产减少原材料、能源和水等各类资源的投入来满足既定生产目的或消费需求，从而在经济活动的源头实现资源节约和碳减排。*以汽车制造业为例，从设计端放弃非必要附件、简化汽车结构、改用轻型材料，能够减少汽车制造过程的资源消耗，实现每年减排8 900万吨碳排放[5,7]。在电子设备制造业领域，配件和包装物的减量化也取得了显著的减排成效。自2020年起，苹果公司的手机产品不再随附充电适配器，由此节省了80万吨铜、锌、锡等原材料投入，提高了产品运输效率，实现了有效的碳减排[8]。除制造业外，建筑业的绿色设计通过打造更轻盈的建筑楼层、融合分布式光伏、优化采光设计等，能够减少水泥等高排放建材的使用，降低投入使用后的建筑能耗和碳排放。

新能源汽车、可再生能源、储能等低碳技术的发展和应用，将增加关键矿产资源的需求[9]。*通过革新制造技术，循环经济能够从缩减用量和物质替代两个方面，实现关键矿产资源消耗量的显著下降，从而保障碳中和路径的实现。*以电动汽车广泛采用的三元锂离子电池为例，通过对欧盟电动汽车电池物质流动的追踪发现，采用循环经济战略增强汽车供应链的弹性和可持续性，可以降低对锂、钴、镍等初级资源的需求，减少初级原材料的开采。技术驱动的减钴策略能够使2017—2050年欧盟电动车电池对钴的累计需求减少54.6%[10]，从而有效缓解碳中和背景下电动车快速扩张引致的资源约束，推动相关低碳技术的应用和推广。

1.2 延长产品周期，提高利用效率的再利用原则

*再利用原则通过延长产品和材料的使用周期，提高产品和材料在生产流动过程中的利用效率，从而实现资源节约和碳减排。*工业领域超过50%的温室气体排放来源于材料生产，提升材料的再利用率可以减少温室气体排放[11]。以塑料为例，当前95%的塑料包装材料在首次使用后就被丢弃，只有14%的塑料包装能够被回收利用[12]。通过再利用原则改善塑料利

用方式，将大幅降低碳排放。研究显示，如果全球塑料使用增长的趋势继续扩大，由塑料导致的碳排放将在2050年达到全球碳预算的15%。而通过实施循环利用和需求管理、应用可再生能源等措施，由塑料导致的温室气体排放在2050年有望保持在2015年的水平[13]。除工业生产外，食物系统也是碳排放的重要来源。将"卖相不佳"的水果和蔬菜进行简易加工制成罐装食品或涂抹酱，以及对临期产品打折促销，都能延长食品生命周期，有效避免食物浪费，到2050年每年可以减少14亿吨碳排放[5]。

提升材料再循环利用率、推进再制造产业发展对于资源节约和碳减排也具有重要作用[14]。研究表明，再制造机械能够对新机械实现置换，有效减少碳排放。以模块化、重复使用、再制造为目的的措施能够有效提高再制造产业的利用效率[15]，到2050年仅车辆再制造领域每年就能减少3 800万吨碳排放[5]。产品的梯次利用对于解决再制造业效率低、成本高的问题也具有重要价值。以动力电池为例，将新能源汽车的退役电池直接进行资源化处理，将造成巨大浪费。报废的动力电池经过检车和重组，可对其中的铅酸电池进行置换，在保障安全可控的基础上，将置换后的电池应用于通信基站、低速电动车等储能领域[16]。

1.3 循环利用资源，减少固废的资源化原则

资源化原则通过推进废弃物综合利用，实现对原生资源的节约和替代，从而可以减少由原生资源开采、冶炼、加工等环节产生的碳排放。以有色金属产业为例，再生有色金属资源的利用可以大幅度降低能源消耗，再生铜、再生铝、再生铅生产的能耗相比于原生铜、原生铝、原生铅生产能耗可以分别降低1 054千克标煤/吨、3 443千克标煤/吨、659千克标煤/吨[17]。2018年，全球铝产业共排放11亿吨CO_2，其中产量占2/3的原生铝生产贡献了95%碳排放，而产量约1/3的再生铝生产仅贡献了5%[18]。在需求不断增长的情况下，需进一步扩大再生铝产量以完成2050年生产每吨铝的碳排放减少75%的目标[19]。关键矿产资源的回收利用和资源化对于实现碳中和也具有重要价值。提高关键矿产资源的回收利用水平和利用效率，可以减少对原生资源的依赖，有效支撑电动汽车、可再生能源等低碳技术的推广[20]。在农业领域，通过再生农业实践可以减少碳密集生产要素的投入，增加土壤固碳能力[5]。

循环经济的资源化还可以有效减少废弃物的产生，进而减少储存、运输、处理固废过程中的碳排放。研究表明，用回收的混凝土细粉代替新水泥，使用废玻璃、粉煤灰作为替代材料，能够减少水泥生产工艺中的碳排放[21]。此外，对再生水生产中的废物进行处理，如回收利用焚烧污泥所排放的甲烷气体、将污泥焚烧灰分中的磷元素制成磷肥，能进一步降低再生水生命周期内的温室气体排放，提高再生水工艺中的资源化利用水平[22]。

2 我国发展循环经济实现碳中和面临的挑战

我国的资源短缺和环境污染问题于20世纪90年代开始显露。为实现经济结构调整和发展模式转变，一些学者借鉴德国和日本的实践开始向国内引入循环经济的思想[23]。经过多年的发展演变，我国已经形成了具有中国特色的循环经济理论、政策与实践[6]。2005年，《国务院关于加快发展循环经济的若干意见》等一系列文件的颁布，标志着我国正式踏上发展循环经济的新道路。2008年，第十一届全国人民代表大会常务委员会第四次会议通过《循环经济促进法》，标志着我国循环经济法治建设迈出坚实一步。党的十九大报告提出建立绿色低碳循环发展的经济体系；推进资源全面节约和循环利用；降低能耗、物耗，实现生产系统和生活系统循环链接。

实现碳达峰、碳中和目标对我国循环经济发展提出了更新和更高的要求。《"十四五"循环经济发展规划》明确指出大力发展循环经济，对保障国家资源

安全，推动实现碳达峰、碳中和，促进生态文明建设具有重大意义；但同时也指出我国循环经济发展仍面临诸多突出矛盾和问题。为实现碳达峰、碳中和目标，当前我国循环经济发展仍存在循环经济治理体系不够健全、循环产业及科技创新体系不够成熟、社会共治体系缺失等关键问题。

2.1 尚未健全的循环经济治理体系，掣肘减碳措施落地

当前，我国针对循环经济发展和碳达峰、碳中和工作缺乏顶层设计和统筹规划，现有循环经济立法、环境改革措施及相关政策缺乏协同联动[24]，尚未建立面向实现碳中和目标的循环经济治理体系。① 我国尚未构建依托循环经济实现碳中和目标的具体路径，尚未制定面向碳中和目标的中长期循环经济发展战略规划。《“十四五”循环经济发展规划》中提到的“五大工程”和“六大行动”涉及多个主管部门，各部门、各层级的责任分工、统筹协调仍有待明确。② 我国东、中、西部地区循环经济发展水平存在显著的阶梯式区域失衡[25]，各地区循环经济发展水平参差不齐，亟待建立涵盖省、市、县级层面，统筹循环经济发展和碳达峰、碳中和工作的路线图和行动方案。③ 尽管我国 2009 年起正式实施《循环经济促进法》，但该法仅对循环经济发展做了原则性规范。与德国、日本等发达国家相比，我国还没有形成促进循环经济发展的完善法律法规体系。另外，除《节约能源法》外，我国能够保障碳中和目标顺利实现的配套法律和制度并不完善。包括“应对气候变化法”“资源利用法”在内的一系列循环经济发展和应对气候变化的法律法规体系尚未建立。

2.2 不够成熟的循环产业及科技创新体系，难以支撑碳中和目标实现

近年来，尽管我国循环经济产业及科技创新体系已经取得了较大发展，但在实践过程中仍存在诸多问题，难以支撑我国实现碳中和目标。① 我国循环经济产业规模较小、产业发展水平较低。贯穿全产业链的生产与消费规范尚未形成，涵盖各地区、各行业、各领域的循环经济网络不够畅通。例如，我国食物浪费现象严重，农业供应链效率较低。适应碳中和需求的再生铝、再生铜等产业的行业占比仍然偏低，距离《“十四五”循环经济发展规划》中提出的 2025 年实现相关产量增长 55%、23% 的目标仍有巨大差距。再制造产品的认证与推广应用不足，高端再制造业发展缓慢[26]，缺乏全面推进循环经济、实现碳中和目标的支撑能力。废品回收行业处于从“线下”向“线上+线下”转型的阶段，“互联网+废品回收”的数字化模式还未推广，固体废弃物回收、拆解、处理的产业链不完善；而且家族式及老乡式非正规回收企业挤占了正规回收企业的业务空间，导致再利用资源化水平较低。② 我国企业绿色低碳循环发展的生产体系、流通体系、消费体系尚未形成。打造循环经济配套设施，健全企业循环经济管理体系，会在初期增加生产运营成本。由于缺乏资金和政策支持，许多企业缺乏对循环经济相关技术研发与应用的积极性。覆盖生态设计、绿色材料投入、绿色包装、废旧物绿色回收的产品全生命周期管理不足，配套生产、回收、处理的环保设施不完备，阻碍了相关产业的低碳转型。③ 我国循环经济与低碳发展的创新能力仍有待提升，对绿色低碳循环产业的机制创新、模式创新、产品创新关注不足。动力电池等废旧物智能化与精细化拆解、稀有金属的深度化分选、垃圾能源化（WtE）和塑料废纸燃料化（RPF）[27]等颠覆性、战略性技术创新进展较为缓慢。

2.3 缓慢成长的循环型社会，不利于低碳理念的全方位普及

当前，我国尚未形成以政府为主导、企业为主体、社会组织和公众共同参与的循环经济治理体系，社会力量参与循环经济与碳中和的积极性不高。① 由

于缺乏引导，公众的绿色低碳生活方式尚未形成，普遍存在快买快扔的“抛弃型”消费行为。除大量使用一次性产品外，手机等电子产品的过快更新换代也造成大量的资源浪费[28]，加剧了固体废弃物的产生。公众对于资源节约、垃圾分类等行为仍然缺乏积极性：“限塑令”、绿色出行等政策实施效果不如预期；许多社区存在垃圾分类不严格、投放站点脏乱、垃圾混收混运等问题。② 相比于欧美国家，我国居民闲置商品的流通度较低。二手市场的规范化程度不足，定价、交易、售后等全流程的标准化、规范化有待提升。尽管“互联网+二手”模式依托“90后”“00后”等年轻消费群体发展迅速，但更广大公众对二手交易的参与度较低，以社区为主体的集中规范的线下“跳蚤市场”不够普遍。③ 我国企业环保信息披露仍处于较低水平，无法满足构建循环经济的信息共享需求。当前，我国仍未构建全国层面的信息共享平台，导致企业环保信息共享不充分，社会组织和公众难以参与到对企业减排行为、政府环保治理的监督中来。科研团体、环保组织缺乏宣传组织能力和资源，未能引导公众广泛参与环境治理[29]。

3 我国发展循环经济实现碳中和的路径和对策建议

综上所述，循环经济“3R”原则对实现碳中和具有重要价值，目前已得到了较为广泛的实践和应用。当前，欧盟等发达经济体都已经把发展循环经济作为应对气候变化和实现碳中和的重要路径[29]。经过多年的发展，我国循环经济取得了显著成绩，产业发展和技术创新都颇有成效。在实现碳中和目标背景下，我国必须着力解决循环经济发展仍存在的诸多问题和挑战，从构建循环经济治理体系、建立循环产业与科技创新体系、打造绿色低碳循环社会等方面稳步推进面向碳中和目标的循环经济机制、政策、模式、技术和产品创新，为实现碳中和目标提供支撑和保障。

3.1 构建面向碳中和目标的循环经济治理体系

应厘清循环经济与碳中和的内涵及其关系，明确循环经济实现碳中和目标的路径，加强循环经济与碳中和的统筹规划和顶层设计，构建面向碳中和目标的循环经济治理体系。① 加强国家发展和改革委员会对循环经济和碳达峰、碳中和工作的统筹协调和监督管理，推动各部门间紧密合作，实现循环经济与碳中和各项工作的紧密衔接。② 分类制定重点区域、重点行业、重点企业面向碳中和的循环经济发展规划，明确相关主体绿色低碳循环发展的阶段目标、实施路线和行动方案，对循环经济相关产业和企业设定具体的碳减排目标，保证循环经济发展与碳中和行动的协同推进。引导地方政府灵活运用财税政策和产业政策支持循环经济产业发展、能源高效利用和资源循环利用。③ 面向实现碳中和目标，适时修订完善《循环经济促进法》《节约能源法》《固体废物污染环境防治法》等现行法律法规，加快推进“资源综合利用法”和“应对气候变化法”等相关法律法规的制定，进一步完善适应碳中和的循环经济法治体系。④ 参考循环经济产业园、“城市矿产”示范基地、“无废城市”建设试点等工作经验，基于“3R”原则在重点地区、重点行业、重点企业探索开展面向碳中和目标的循环经济发展试点工作，创新体制机制，努力形成一批可复制、可推广的绿色低碳循环经济发展经验和模式。

3.2 建立面向碳中和目标的循环产业与科技创新体系

完善的产业体系和科技创新体系是发展循环经济与实现碳中和目标的关键。应积极构建绿色低碳循环产业体系与科技创新体系，提高资源利用效率，为碳中和目标的实现提供有力支撑。① 构建面向碳中和的绿色低碳循环发展生产、流通和消费体系。对相关循环经济行业和企业给予更多扶持，统筹推进相关行业和企业全产业链绿色生产改造，推行产品生态设计，实现产品全生命周期的绿色低碳，提高产业链、价值

链、供应链绿色低碳循环水平。② *构建面向碳中和的循环农业发展模式，进一步减少我国食品供应链存在的浪费*。延长农产品使用周期，提高农林废弃物资源化利用水平，促进循环农业发展。通过改善食品储存方式、加强物流冷链基础设施建设、完善食品物流配送体系、补齐食品加工和包装基础设施短板来优化食品储存、运输和加工过程[24]。③ *在扩大内需的基础上加强我国产品的国内流通与循环，为资源回收型企业的发展提供原料支持与市场支持*。完善废旧物资回收利用体系，加强废纸、废塑料、废旧轮胎、废金属、废玻璃等再生资源回收利用，提高再生资源和关键矿产资源的回收利用水平，支持再生金属、再生水等循环再生产业的发展。④ *实施绿色低碳循环技术创新技术攻关行动*。将循环经济和碳中和战略技术纳入国家重点研发计划和国家重大科技专项中，布局国家重点实验室，设立相关科研专项推动关键金属等稀有资源高效利用、动力电池等新型废旧物回收拆解、再生农业在内的循环低碳技术的研发与应用。⑤ *鼓励企业、高校、科研机构深度融合*。协同培养循环经济与碳中和领域的创新人才，建设绿色低碳循环技术创新项目孵化器和协同创新创业平台，推动绿色低碳循环技术转移和创新成果转化。

3.3 打造面向碳中和目标的绿色低碳循环社会

加快推动绿色低碳循环发展需要形成以政府为主导、企业为主体、社会组织和公众共同参与的多元治理体系。通过激活全社会协力共建的活力，将循环经济和碳中和发展的各项重点工作落到实处。① *重视媒体的舆论引导作用，营造发展循环经济的良好社会氛围*。夯实循环经济理念，传播普及“3R”理念和绿色低碳循环经济知识；培育绿色低碳意识，鼓励公众减少塑料等一次性制品使用，培养可持续饮食习惯，增强垃圾分类意识，选择绿色出行方式，购买绿色产品，推动公众在衣、食、住、行等方面加快向绿色低碳生活方式转变。② *在全国范围内构建共享循环交通体系*[24]。以信息技术为支撑打造以智能公共交通为纽带的城市交通网络，全面提升公共交通系统的运行效率，扶持共享单车企业的发展，进一步满足居民的多样化出行需求，降低城市出行碳排放。③ *要规范发展我国二手市场*。打造“线上+线下”的二手流通平台，构建完善的“互联网+二手”模式。完善社区绿色低碳循环的运营管理模式，建设集中规范的“跳蚤市场”，促进家庭闲置物品交易与流通，提高产品再利用水平。④ *加强绿色低碳循环社区建设*。推进绿色低碳循环社区试点，完善社区绿色低碳循环的运营管理模式，开展社区循环低碳发展模式创新和体制创新。⑤ *结合大数据等新一代信息技术，构建面向碳中和的循环经济产业环保信息共享和监督平台*。实现政府、企业、社会组织和公众间环境信息的共享和互动。充分保障公众对绿色循环低碳发展及重点工作的知情权、参与权和监督权，调动社会组织和公众参与绿色低碳循环治理监督的积极性和主动性，打造政府、企业、社会组织和公众协力共建的绿色低碳循环社会。

参考文献

1 数据资讯：全球碳中和的学界研究与政府规划概况. 中国科学院院刊, 2021, 36(3): 367-370.

2 Su B W, Heshmati A, Geng Y, et al. A review of the circular economy in China: Moving from rhetoric to implementation. Journal of Cleaner Production, 2013, 42: 215-227.

3 Geng Y, Sarkis J, Bleischwitz R. How to globalize the circular economy. Nature, 2019, 565: 153-155.

4 Stahel W R. The circular economy. Nature, 2016, 531: 435-438.

5 Ellen MacArthur Foundation. Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change. (2019-09-26)[2021-08-30]. https://emf.thirdlight.com/link/2j2gtyio-n7ia-n3q5ey/@/preview/1?o.

6 诸大建, 朱远. 生态文明背景下循环经济理论的深化研究. 中国科学院院刊, 2013, 28(2): 207-218.

7 Allwood J M. Unrealistic techno-optimism is holding back progress on resource efficiency. Nature Materials, 2018, 17(12): 1050-1051.

8 Apple Inc. Environmental Progress Report 2021. (2021-04-01)[2021-08-30]. https://www.apple.com.cn/environment/pdf/Apple_Environmental_Progress_Report_2021.pdf.

9 Nansai K, Nakajima K, Kagawa S, et al. Global flows of critical metals necessary for low-carbon technologies: The case of neodymium, cobalt, and platinum. Environmental Science & Technology, 2014, 48(3): 1391-1400.

10 Baars J, Domenech T, Bleischwitz R, et al. Circular economy strategies for electric vehicle batteries reduce reliance on raw materials. Nature Sustainability, 2021, 4(1): 71-79.

11 Hertwich E G. Increased carbon footprint of materials production driven by rise in investments. Nature Geoscience, 2021, 14(3): 151-155.

12 Ellen MacArthur Foundation. The New Plastics Economy—Rethinking the Future of Plastics. (2017-11-22)[2021-08-30]. https://emf.thirdlight.com/link/ftg1sxxb19tm-zgd49o/@/preview/1?o.

13 Zheng J J, Suh S. Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics. Nature Climate Change, 2019, 9(5): 374-378.

14 Mathews J A, Tan H. Circular economy: Lessons from China. Nature, 2016, 531: 440-442.

15 Peng S T, Yang Y, Li T, et al. Environmental benefits of engine remanufacture in China's circular economy development. Environmental Science & Technology, 2019, 53(19): 11294-11301.

16 Safanama D, Ji D X, Phuah K C, et al. Round-trip efficiency enhancement of hybrid Li-air battery enables efficient power generation from low-grade waste heat. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 8(50): 18500-18505.

17 工业和信息化部. 再生有色金属产业发展推进计划. (2011-02-11)[2021-08-30]. http://www.gov.cn/gzdt/2011-02/11/content_1801310.htm.

18 IAI. Aluminium Sector Greenhouse Gas Pathways to 2050. (2021-03-01)[2021-08-30]. https://international-aluminium.org/resource/aluminium-sector-greenhouse-gas-pathways-to-2050-2021/.

19 Cullen J M, Allwood J M. Mapping the global flow of aluminum: From liquid aluminum to end-use goods. Environmental Science & Technology, 2013, 47(7): 3057-3064.

20 Watari T, Nansai K, Nakajima K, et al. Integrating circular economy strategies with low-carbon scenarios: Lithium use in electric vehicles. Environmental Science & Technology, 2019, 53(20): 11657-11665.

21 Du Y B, Yang W C, Ge Y, et al. Thermal conductivity of cement paste containing waste glass powder, metakaolin and limestone filler as supplementary cementitious material. Journal of Cleaner Production, 2021, 287: 125018.

22 呼永锋, 梁梅, 张永祥, 等. A^2/O+MBR工艺运行效果与碳排放特征研究. 中国环境科学, 2021, doi: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210517.005.

23 诸大建. 中国循环经济与可持续发展. 北京: 科学出版社, 2007.

24 Ellen MacArthur Foundation. The Circular Economy Opportunity for Urban & Industrial Innovation in China. (2018-9-19)[2021-08-30]. https://emf.thirdlight.com/link/tfoi8n2iwpa8-bg-7jz3/@/preview/1?o.

25 马晓君, 李煜东, 王常欣, 等. 约束条件下中国循环经济发展中的生态效率——基于优化的超效率SBM-Malmquist-Tobit模型. 中国环境科学, 2018, 38(9): 3584-3593.

26 Yuan X L, Liu M Y, Yuan Q, et al. Transitioning China to a circular economy through remanufacturing: A comprehensive review of the management institutions and policy system.

Resources, Conservation and Recycling, 2020, 161: 104920.
27 Dong H J, Geng Y, Yu X M, et al. Uncovering energy saving and carbon reduction potential from recycling wastes: A case of Shanghai in China. Journal of Cleaner Production, 2018, 205: 27-35.
28 Awasthi A K, Li J H, Koh L, et al. Circular economy and electronic waste. Nature Electronics, 2019, 2(3): 86-89.
29 孟小燕, 王毅, 郑馨竺. 碳中和愿景下的循环经济建设: 芬兰图尔库市的管理经验及启示. 环境保护, 2021, 49(12): 76-80.

Toward Carbon Neutrality: Circular Economy Approach and Policy Implications

WEI Wendong[1,2] CHEN Zhujun[3] GENG Yong[1,2,4*] CAI Wenqiu[1,2] LIU Hanbin[5]
(1 School of International and Public Affairs, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;
2 SJTU-UNIDO Joint Institute of Inclusive and Sustainable Industrial Development, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;
3 Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
4 School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
5 Shanghai Municipal Development and Reform Commission, Shanghai 200003, China)

Abstract It is challenging to promote global climate change governance under the current complicated international contexts. As a country with the largest carbon emission, China has committed to achieve carbon peak by 2030 and carbon neutrality by 2060. However, carbon neutrality is a complex system engineering and relies on the implementation of circular economy. Based upon “3R” principles of reduce, reuse, and recycle, this study investigates the internal relations between circular economy and carbon neutrality and identifies the key position of circular economy in achieving carbon neutrality targets. Several policy implications are raised to help promote the development of circular economy and achieve carbon neutrality targets.

Keywords circular economy, carbon neutrality, “3R” principles, resource efficiency, energy saving, emissions reduction



魏文栋 上海交通大学国际与公共事务学院、上海交通大学-联合国工业发展组织绿色增长联合研究院副教授、博士生导师。主要从事生态文明建设、碳达峰碳中和研究。主持国家自然科学基金青年科学基金项目等国家级和省部级课题5项，入选上海市青年科技英才扬帆计划。在*Nature Sustainability*等国内外学术期刊上发表论文60余篇。
E-mail: wendongwei@sjtu.edu.cn

WEI Wendong Associate Professor and Doctoral Supervisor at the School of International and Public Affairs, and the SJTU-UNIDO Joint Institute of Inclusive and Sustainable Industrial Development, Shanghai Jiao Tong University. He focuses on researches including ecological civilization, carbon peak, and carbon neutrality. He has led 5 national and provincial projects, including sponsorship by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation

*Corresponding author

of China. He has also been selected for the Shanghai Sailing Program. He has published more than 60 papers in academic journals such as *Nature Sustainability*. E-mail: wendongwei@sjtu.edu.cn



耿　涌　上海交通大学环境科学与工程学院院长、国际与公共事务学院副院长、碳中和发展研究院副院长，上海交通大学-联合国工业发展组织绿色增长联合研究院院长。国家杰出青年科学基金获得者。主要从事循环经济、产业生态学、环境管理、气候变化政策研究。先后承担国家重点研发计划项目等重大课题。代表中国政府参加联合国政府间气候变化委员会第五次和第六次科学评估报告任主要作者，担任联合国工业发展组织（UNIDO）资源效率与清洁生产项目专家。在*Science*、*Nature*、*Science Advances*、*Nature Climate Change*、*Nature Communications*等国内外期刊上发表论文300余篇。E-mail: ygeng@sjtu.edu.cn

GENG Yong　Dean of the School of Environmental Science and Engineering and the SJTU-UNIDO Joint Institute of Inclusive and Sustainable Industrial Development, Shanghai Jiao Tong University. Deputy Dean of the School of International and Public Affairs and Research Institute of Carbon Neutrality, Shanghai Jiao Tong University. He was awarded the National Science Fund for Distinguished Young Scholars of the National Natural Science Foundation of China. He focuses on researches of circular economy, industrial ecology, environmental management, climate change policy, and so on. He has undertaken several national key projects, such as the National Key Research and Development Program of China. On behalf of the Chinese government, he participated in the fifth and sixth Scientific Assessment Reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC-AR5, IPCC-AR6). He also served as an expert on the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) Project on Resource Efficiency and Cleaner Production. He has published more than 300 papers in academic journals such as *Science*, *Nature*, *Science Advances*, *Nature Climate Change*, and *Nature Communications*. E-mail: ygeng@sjtu.edu.cn

■责任编辑：岳凌生